

希腊斯克瑞斯铜-金-铂族元素矿床*

张雪旒^{1,2}, 聂凤军^{2* * *}, 王佳新^{1,2}

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

斯克瑞斯(Skouries)矿床位于希腊北部哈尔基迪基(Chalkidiki)半岛, 地理坐标为N 40°28'20", E 23°42'11"(Forward, 2011)。1963年该矿床首次被发现, 截止2011年, 该矿床已生产520万t铜和6.8t金, 铜平均品位为0.5%, 金平均品位为0.8g/t; 预计开采寿命为27年。1991年Economou-Eliopoulos等在对该矿床研究时发现, 其铜矿石中铂族元素含量可观, 其中钯平均品位为 110×10^{-6} , 铂平均品位为 17×10^{-6} 。该发现引起了地质学家的研究兴趣, 这些研究成果不仅丰富了找矿信息和成矿理论, 还因为中国也发现了富铂族元素的斑岩型铜矿床, 因此对斯克瑞斯矿床特点及成矿规律的系统总结, 可为在中国境内寻找同类矿床提供参考。

1 成矿环境

斯克瑞斯矿床位于塞尔维亚马其顿构造带(Serbo-Macedonian)(图1)。该构造带宽30~60 km, 长300 km, SE向延伸, 由一系列古生代角闪岩相结晶岩系构成, 以斯特拉托尼-瓦尔瓦拉断裂(Stratoni-Varvara)为界, 分为凯迪里阿组(Kerdylia)和韦尔蒂斯斯科斯组(Vertiskos)2套构造-岩相单元(Melfos et al., 2012)。韦尔蒂斯斯科斯组主要为角闪片麻岩、黑云母片岩及角闪岩夹层, 为斯克瑞斯矿床的赋矿岩层。凯迪里阿组主要由花岗岩化-混合岩化云母片麻岩、角闪岩和大理岩岩层组成(图2)。晚古生代沉积岩不整合于结晶基底之上, 经中生代造山运动, 两者交错叠加并变质为绿片岩相(Himmerkus et al., 2009)。受非洲板块向欧洲板块的俯冲运动影响, 区内古近纪发育多期岩浆活动, 其分布受深部断裂的控制, 且区内矿床

均与该时期的岩浆活动及深大断裂有关。

2 矿床地质

斯克瑞斯矿床由多条近垂直的亚碱性管状侵入岩组成, 这些侵入岩于19 Ma侵入于韦尔蒂斯斯科斯组角闪岩相云母片岩和黑云母片麻岩中, 地表出露范围为 $200 \times 200 \text{ m}^2$, 垂向延深800 m以上。主要有4种岩石类型, 分别为第一期二长斑岩、第二期二长斑岩、第三期斑岩和最后期斑岩, 其中第二期二长斑岩及第三期斑岩与成矿关系较密切(图3)(Kroll et al., 2002)。

热液活动导致围岩与斯克瑞斯斑状侵入体发生强烈蚀变。矿体主要赋存于侵入体中心及周围环状钾化蚀变带中。钾化带蚀变矿物主要包括, 钾长石、黑云母、石英和大量磁铁矿。钾化蚀变外围为青磐岩化, 蚀变矿物主要为绿泥石、绿帘石、钠长石和方解石。绢英岩化和泥化蚀变较弱。

矿体上部距地表30 m范围内为蓝铜矿-孔雀石组成的氧化带。其下方为含铜蓝-黄铜矿的表生富集带。深部矿体主要由石英-黄铜矿-黄铁矿-斑铜矿细脉组成, 硫化物含量约为2%~3%。矿体中心部位的铜矿石中钯-铂含量较高。

矿石以脉状、网脉状及浸染状为主, 包括2种矿物组合: ①磁铁矿-斑铜矿-黄铜矿, 具钾化-青磐岩化蚀变特征, 分布于矿床的中间部位; ②黄铜矿-黄铁矿, 分布于矿体深部及矿体外围。矿石以细粒斑状结构为主, 斑晶主要由角闪石、黑云母(2%~20%)、斜长石(20%~45%)和钾长石(10%~40%)

* 本研究得到国家重点自然科学基金项目(编号: 41030421)和地质调查项目(编号: 1212010811029)联合资助

第一作者简介 张雪旒, 女, 1989年生, 在读研究生, 岩石学、矿物学、矿床学专业。Email: 619823112@qq.com

* * 通讯作者 聂凤军, 男, 1956年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事金属矿床地质和地质化学研究。Email: nffj@cei.gov.cn

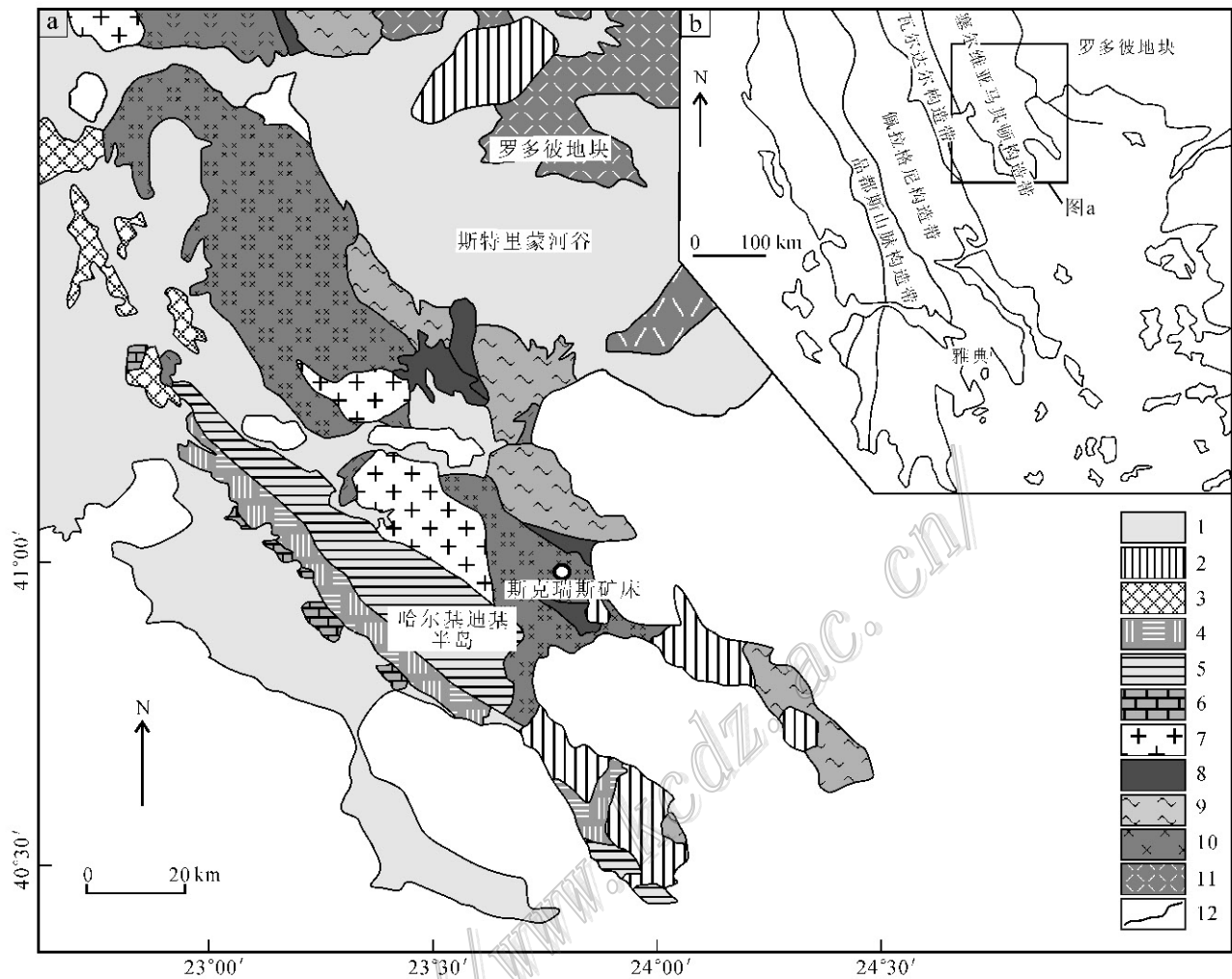


图 1 塞尔维亚马其顿区域地质图(a)和希腊造山带构造图(b) (根据 Melfos et al., 2012 修改)

1—新生代沉积岩; 2—新生代花岗岩; 3—大理石; 4—阿司匹威瑞斯组(Aspri Vrisi Units); 5—麦丽斯科瑞组(Melissochori Units); 6—蛇绿岩(环罗多彼构造带); 7—侏罗纪花岗岩; 8—蛇绿岩(塞尔维亚马其顿构造带); 9—凯迪里阿组; 10—韦尔蒂斯斯科斯组; 11—潘根大理石(Pangeon Marbles); 12—地质界线

组成。基质主要为钠长石(45~55%)、钾长石(40%)、细粒石英、黑云母及浸染状磁铁矿(Economou-Eliopoulos et al., 2000)。自然金和银金矿常以包裹体的形式赋存于黄铜矿中,或富集在斑铜矿边缘,粒径为5~100 μm。主要含钼矿物为碲钼矿,通常以包裹体形式赋存于黄铜矿及斑铜矿中,或以自形晶赋存于黄铜矿边缘(Mingall, 2005)。

3 矿床成因

(1) 矿区铜矿化均见于蚀变花岗斑岩和两侧围岩中。岩脉与围岩蚀变分带清晰,具有典型的花岗斑岩矿床蚀变分带和矿化特征,属于斑岩型铜矿。

(2) 斯克瑞斯矿床的形成受双重构造因素的控制。一方面,受非洲板块向亚欧板块俯冲作用的影响;另一方面,受区内斯特拉托尼-瓦尔瓦拉深大断裂(Stratoni-Varvara)和费南德兹-戈默蒂深大断裂(Megali Panaghia-Gomati)及其次级断裂的影响(图2)。该矿床与渐新世侵入韦尔蒂斯斯科斯组的侵入岩具有密切的空间分布关系。侵入岩以二长闪长岩和石英二长岩为主。其中,石英二长岩与网脉状矿化关系最为密切。

(3) Economou-Eliopoulos 等(2000)和 Frei (1995)认为成矿物质、热液及其相伴生的中酸性岩体都来自上地幔(或下地壳)。岩浆在上升到地壳底部时发生分馏作用,并与壳源物质相互作用,使得原

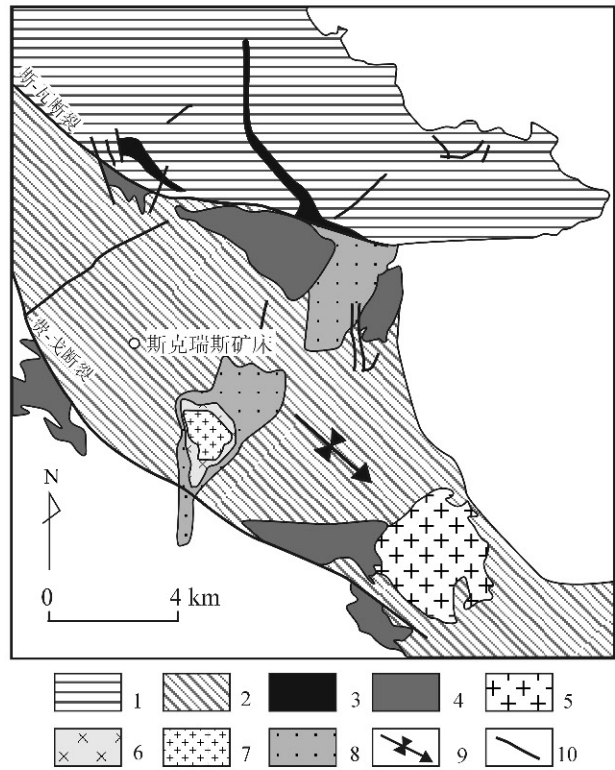


图 2 哈尔基斯基半岛东北部地质素描图
(根据 Frei, 1995 修改)

1—凯迪里阿组；2—韦尔蒂斯斯科斯组；3—大理石；4—TVG 杂岩；5—花岗岩；6—斑状正长岩；7—闪长岩；8—蚀变带；9—向型构造轴线方向；10—主断裂

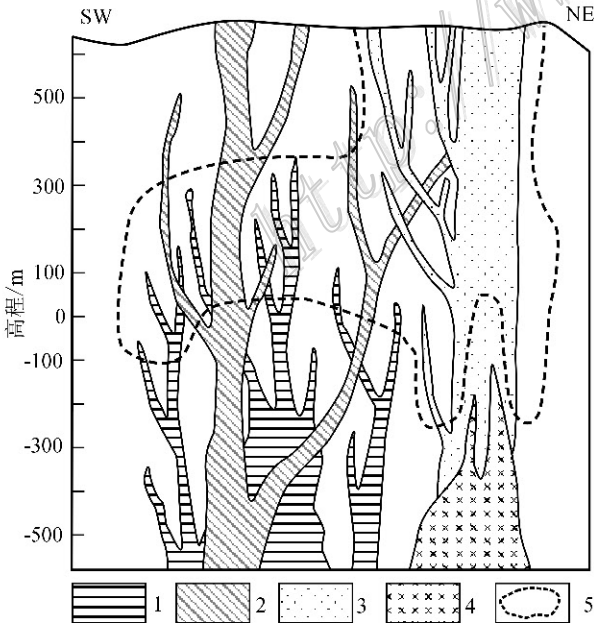


图 3 斯克瑞斯侵入体地质截面图
(根据 Kroll et al., 2002 修改)

1—第一期二长斑岩；2—第二期二长斑岩(主侵入岩)；3—第三期斑岩；4—最后期斑岩；5— $w(\text{Cu})$ 为 25% 的界线

岩浆密度变小,从而使得更多的岩浆上升到更高的壳层。同时,岩浆在上侵及侵位后结晶的过程中分异出的大量挥发性组分,聚集形成了超高压区。当体系内压力大于外部压力时,岩浆流体冲破顶板,沿断裂系统向上、向外运移,并在次级断裂构造中成矿。

(4) 流体及金属元素来源

铜矿化与钾化、硅化蚀变关系密切,两者表现为显著的正相关关系,表明矿化主要与中-高温热液活动有关。氢、氧同位素研究表明,成矿流体主要来源于岩浆水。矿石中黄铜矿与黄铁矿的硫同位素特征表明,硫主要来自岩浆流体。岩浆流体对成矿物质的萃取、迁移及沉淀起关键作用。

从围岩到矿化中心,石英包裹体具多期次特征,早期青磐岩化矿脉的流体具有高盐度、高挥发分的特征,包裹体均一温度为 $450\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。晚期蚀变矿脉中石英包裹体均一温度为 $270\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。高温、高盐度的流体与铜的沉淀密切相关,而温度及盐度相对较低的流体与铜矿中金和银的矿化有关。这些低温、低盐度流体为大气水及岩浆水混合的产物。同时,硫同位素地质温度计算结果也表明矿床至少经受了 2 次蚀变交代作用,与包裹体测温结果一致。

斯克瑞斯矿床中侵入岩的大离子亲石元素含量较高,且云母含氟量高,结合硫同位素与铅-铋同位素推测,该铜矿中铜元素主要为岩浆分异的产物。另外斯克瑞斯矿床斑岩中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值较高,且赋矿围岩与斯克瑞斯矿床铅同位素相似,表明侵位前侵入体在一定深度的地壳中滞留过一段时间,并与韦尔蒂斯斯科斯组发生混染。而区内 NE 向深部断裂为岩浆的侵入作用提供了通道。此外,斑岩周围少见较大的蚀变晕,说明铜元素不是韦尔蒂斯斯科斯组上部岩石淋滤作用的产物。

矿床中热液磁铁矿含量较多,反映了其母源熔体具高氧逸度,而熔体高氧逸度通常是富金斑岩型铜矿的特点,这与该矿床金含量较高的事实相符。矿石中金和银含量呈一定的正相关性,且在氧化带中相关系数最高,因此推测银的迁移富集过程可能与金相同。此外,黄铜矿中的银金矿包体以及金、银与铜之间较高的正相关关系说明,铜可能与贵金属元素在成矿早期一起沉淀于斑岩矿脉中。而金、银与碲之间的相关关系表明,在矿床演化的后期,部分贵金属从早期矿化脉中淋滤出来,并富集于次生碲化物中。

除金外,斯克瑞斯矿床的铂-钯含量也较高,主要分布在矿体中心,且与钾化及青磐岩化关系密切。铅-铋同位素研究表明,铂族元素矿物主要来自幔源。同时,陆壳的部分熔融、热液流体及先存矿化体与岩浆的混染作用也提供了部分成矿物质。斑岩铜矿的矿脉中,钯的碲化物富集于黄铜矿及斑铜矿晶粒周围或以包裹体形式赋存于铜矿物中,说明钯-铂矿化可能与主成矿期早期的铜矿化有关。蚀变带中钯-铂元素的富集,主要与热液系统演化程度及其在淋滤过程中的再次分配、富集有关。

4 找矿标志

(1) 斯克瑞斯矿床与渐新世韦尔蒂斯斯科斯组的侵入岩具有密切的空间分布关系。因此,该区渐新世浅成岩株,特别是二长斑岩、石英二长岩和二长闪长岩是寻找斑岩铜矿床的标志。

(2) 区域大型断裂为岩浆侵入创造了构造条件,二级断裂构造是岩浆、热液、成矿物质的运移通道,次级断裂、裂隙带、破碎带,特别是构造交汇和转换部位,更是容矿和储矿场所。因此断裂构造显然也是一个重要的找矿标志。

(3) 区内硅化、钾化、青磐岩化蚀变与铜-金-铂族元素矿化关系密切,是重要的找矿标志。

(4) 富金的斑岩体,高钾钙碱性岩浆岩是铂族元素的找矿标志。

5 初步结论

(1) 斯克瑞斯矿床与 19 Ma 侵入韦尔蒂斯斯科斯组的亚碱性侵入岩在空间上关系密切。

(2) 斯克瑞斯矿床形成受非洲板块向亚欧板块俯冲作用影响;同时区内两条 NE-SW 向深大断裂,及其次级断裂的影响对矿床的形成及分布意义重大。

(3) 斯克瑞斯矿床形成与岩浆房分异的高挥发

分、高分馏程度的热液流体关系密切,岩浆在上侵过程中有陆壳重熔岩浆参加。

(4) 矿床中的铜元素是岩浆分异作用的产物,而非上部岩石淋滤作用的产物。

(5) 矿床中的金-银含量呈正相关,这些贵金属元素在成矿早期与铜元素共同沉淀,成矿后期部分从早期矿脉中淋滤出来,并富集于次生碲化物中。

(6) 矿床的铂族元素含量较高,与铜矿化关系密切,主要分布在矿体中心。研究表明,铂族元素主要来自幔源,同时陆壳的部分熔融及与岩浆的混染也提供了部分成矿物质。

参考文献/References

- Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos D G. 2000. Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance [J]. *Ore Geology Reviews*, 16(1): 59-70.
- Frei R. 1995. Evolution of mineralizing fluid in the porphyry copper system of the Skouries Deposit, Northeast Chalkidiki (Greece); evidence from combined Pb-Sr and stable isotope data [J]. *Econ. Geol.*, 90(4): 746-62.
- Forward P. 2011. Skouries Cu/Au project, Greece NI 43-101 technical report [R].
- Himmerkus F, Reischmann T and Kostopoulos D. 2009. Serbo-Macedonian revisited: A Silurian basement terrane from northern Gondwana in the Internal Hellenides, Greece [J]. *Tectonophysics*, 473(1): 20-35.
- Kroll T, Miller D, Seifert T, Peter M and Schneider A. 2002. Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries porphyry Cu-Au deposit, Chalkidiki, Greece [J]. *Mineralium Deposita*, 37(1): 137-44.
- Mingall J E. 2005. Exploration for platinum-group element deposits [J]. *Econ. Geol.*, 100(8): 203-246.
- Melfos V and Voudouris P C. 2012. Geological, mineralogical and geochemical aspects for critical and rare metals in Greece [J]. *Minerals*, 2(4): 300-317.